

南化水庫集水區崩塌地及其地景指標分析

田雨晴^[1] 江介倫^[2*] 張司璇^[1]

摘要 全球氣候變遷，極端降雨事件發生頻繁，對台灣坡地造成嚴重土砂災害，本研究以南化水庫集水區為研究樣區，由 2008 年至 2013 年之衛星影像判釋歷年研究區之崩塌地分布，並分析各年崩塌地變遷與降雨量的關係，探討颱風強降雨對崩塌的影響，及崩塌地景結構變化過程。研究結果顯示，颱風降雨是影響崩塌的關鍵，也是影響崩塌地自然復育的重要因素，颱風擾動頻率增加與大型降雨事件會致使崩塌比增加，進而影響崩塌地恢復速率，成果可供集水區治理參考。

關鍵詞：地景指標、崩塌、颱風

Landslide and its landscape metrics analysis in Nanhua reservoir watershed

TIAN, YU-QING^[1] CHIANG, JIE-LUN^[2*] JHANG, SIH-SYUAN^[3]

Abstract In recent years, global climate changes violently, extreme rainfall events occur frequently and also cause massive disasters. Therefore, this study used the satellite image and geographic information system to classify the landslide in Nanhua Reservoir from 2008 to 2013. Analysis of collapse and rainfall for each year relationship with the typhoon, and use the numerical terrain model and landscape index analysis, to explore the characteristics and structural changes collapse. The study showed that the increasing frequency of typhoon disturbance and the large-scale rainfall events increase collapse ratio and affect the rate of collapse recovering. Through rainfall data and collapse area analysis, we also found the rainfall from typhoons is the key point which leads to large-scale collapse. Under the consideration of the reservoir catchment area management, it's suggested that large slope collapse inventory and remediation should be strengthened after extreme rainfall events in order to reduce the risk of reservoir sedimentation.

Key Words: landscape metrics, landslide, typhoon

一、前言

近年來全球氣候變遷，以往所謂的極端降雨事件次數發生頻繁，對台灣之坡地屢次造成嚴重土砂災害，南化水庫為南臺灣重要之水利設施，也為嘉義、臺南與高雄地區重要民生用水來源，然南化水庫集水區地質條件脆弱，區內多泥質砂岩分布，每逢颱風汛期間豪雨沖刷侵蝕，易造成水庫嚴重淤積；2008 年卡玫基颱風在集水區降下超大豪雨，導致南化水庫淤積 2,000 萬立方公尺，壩前淤積高程達 143m，造成水庫蓄水量嚴重縮減且危及取水工的取水功能，近年隨遙測技術的快速發展，遙測影像成為環境監測的利器。故本研究以 SPOT 系列衛星影像分析 2008 年至 2013 年南化水庫集水區崩塌地變化情形，分析各年崩塌地變遷與降雨量的關係及颱風強降雨對崩塌的影響，並結合地景指標與地形特性分析區內崩塌地特徵，探討崩塌地特性與崩塌地景結構變化過程，提供未來在水庫集水區管理經營的治理參考。

二、文獻回顧

1. 崩塌成因與災害特性研究

林信輝 (2006) 指出臺灣地區常見的崩塌類型有兩種：

地震型崩塌及降雨型崩塌，地震所引發之崩塌，除大面積地滑外，大多屬於淺層崩塌、崖落，多位於凸坡之坡頂，其規模較小。Fuchu et al. (1999)；洪如江 (2000) 指出降雨引發之崩塌則多發生於山腹及邊坡坡趾，其規模通常較地震引發之崩塌來得大。

陳家平 (2013) 以福衛二號影像判釋臺灣淤積率前三高水庫(曾文水庫、南化水庫、石門水庫)集水區崩塌，指出各水庫集水區崩塌最易發生在坡度七級坡之區位，曾文、南化水庫易發生崩塌坡向為東、東南、南、西南，石門則是東、東北、東南；土地使用類型分別是水利使用地、裸露地及森林使用地；高程為 1250~1750 公尺、750~1000 公尺及 3250~3500 公尺。

陳天健等人 (2014) 分析之隘寮溪流流域地震型與降雨型崩塌特性之差異，成果顯示地震之崩塌坡度主要分佈於 30 - 50 度，75% 位於山脊或山腹，90% 崩塌之面積小於 10 公頃；而颱風之崩塌坡度則主要分佈於 20 - 40 度，81% 位於山腹或坡趾，且中大型崩塌面積明顯增多，52% 崩塌之面積大於 10 公頃，而颱風引致大型崩塌之數量較地震事件顯著。

2. 遙測(RS)與地理資訊系統(GIS)技術探討崩塌

[1] 屏東科技大學水土保持系研究生

Graduate Student, Dept. of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung 912, Taiwan.

[2] 屏東科技大學水土保持系副教授 (*通訊作者 E-Mail: jlchiang@mail.npust.edu.tw)

Associate Professor, Dept. of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung 912, Taiwan.

監測變遷研究

張政亮 (2006) 傳統崩塌地調查方式係採現地勘查為主，然近年來隨空間資訊的發展和航遙測技術的進步，使現在的崩塌監測可在短時間內完成大範圍調查，並以地文資料輔以分析崩塌潛因，對於災害分析與監測具有便利性。

孔德懷 (2005) 蒐集清水溪集水區自九二一大地震前後共 6 期之 SPOT 衛星影像，運用地理資訊系統中網格計算方法，將各期影像中變遷區加以累計，可快速得到本區共五期變遷影像之崩塌區之範圍。並將崩塌區套疊清水溪集水區之高程、坡度、坡向、地質、水系與道路等圖層，可藉以探討清水溪集水區中崩塌地特性之變遷。

3. 地景生態學在崩塌研究的應用

黃志成、馮豐隆 (1998) 地景生態學是以地景為研究主題，將地理學與生態學結合產生的交叉學科，鄔建國 (2003) 為地景的結構、功能與變遷是相互依賴作用的，地景結構決定功能，而結構的形成與發展又受功能的影響，地景結構和功能又必然隨時間變遷，其變遷過程反映自然和人為、生物和非生物等的交互作用和綜合影響。

目前已有許多學者在地景生態學的基礎上廣泛發展多項地景指標(landscape metrics)來描述地景的空間結構，地景指標提供有關景觀組成和配置的相關資訊，並藉此探討生態過程及交互作用的影響。Leitao et al. (2006) 地景指標的分析研究依空間尺度的不同劃分為三大層級：嵌塊體(patch)、類別(class)和景觀(landscape)，研究者依不同的研究目的採取不同的層級架構(圖 1)。

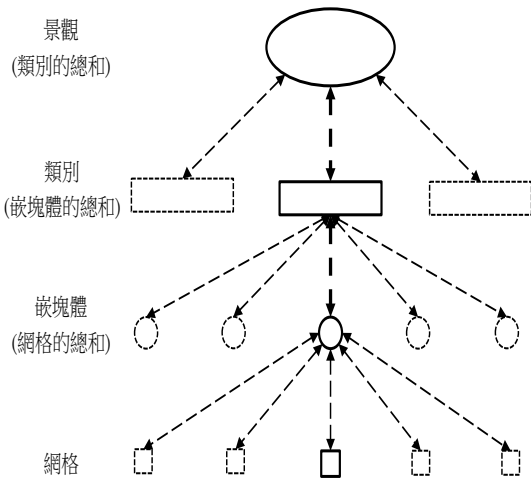


圖 1 地景指標層級概念圖
Fig.1 Landscape metrics diagram

資料來源：改編自 Leitao, A.B., Miller, J., Ahern, J., McGarigal, K., 2006, Measuring Landscapes: A Planner's Handbook, Island Press, Washington, D.C.

三、材料與方法

1. 研究區域概述

南化水庫位於台南市南化區，建於曾文溪支流後堀溪上，主流長度約 28 公里，後堀溪左右兩岸支流甚多，集水

區形狀南北狹長，四周分水嶺標高約介於 800 公尺至 1100 公尺之間，地勢由東北向西南傾斜，區域內泥岩廣泛分布，岩性極易受水沖蝕，故地表常有蝕溝裸露，為該區的主要地形特徵集水面積約 108.29 平方公里，主要目的為民生用水，為南區公共給水的重要建設。

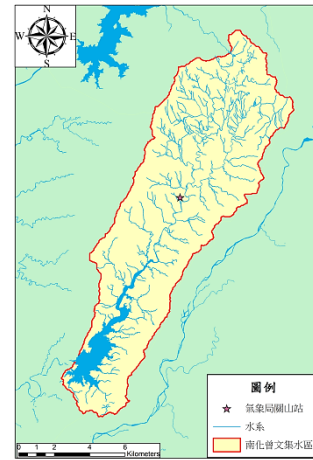


圖 2 南化水庫集水區水系及區內雨量站位置圖
Fig.2 Nanhua reservoir watershed location map

2. 方法介紹

地景指標係指利用土地利用之空間圖層資料，進行嵌塊體特性的量化。地景指標可即時描述地景的空間結構，並提供鑲嵌體的資訊，如區域內每一地景型態或類型的百分比或地景要素所組成的形狀，其為描述嵌塊體或嵌塊體之鑲嵌體的幾何與空間特性(空間的等質性)之工具，地景指標會隨著地景屬性而改變，彼此有高度的相關，故地景指標能夠將地景異質性與棲地破碎化的程序量化，提供地景類型與程序較佳的瞭解。近年來由於地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)的空間分析技術成熟，再加上高解析力的衛星影像影像取得容易，使得地景生態指標的應用有顯著的增加。

地景指標在研究上主要被作為描述地景生態系統型態及趨勢的工具，多在分析地景結構變化對生態系統的影響(McGarigal and Mark, 1995)，然而其空間面向思考景觀變化過程的特性亦被廣泛應用於崩塌地研究。林文賜等人(2007)以地景指標分析 1999 年至 2006 年間九份二山崩塌地變遷狀況，指出在 2006 年後平均嵌塊體指標最小，顯示大範圍的崩塌空間已逐漸復育而破碎化。形狀指標而言，顯示整體在受地震擾動後，比對各指標值，指標呈現下降趨勢；聚集度指標中發現經地震後嵌塊體聚集度逐漸增加，而多樣性指標顯示逐年有增加之趨勢，顯示景觀多樣性受植生復育影響。以下針對諸多指標中與崩塌較相關之指標其描述的特性與概念詳加說明。重要廣泛使用的指標如下表：

(1)嵌塊體層級：

在空間單元裡，嵌塊體是由某特定土地覆蓋類型網格所構成，並以相鄰與否定義個別嵌塊體，嵌塊體層級指數是將個別嵌塊體的特徵加以量化，通常嵌塊體層級指數並不會直接被詮釋應用，而是作為類別層級或景觀層級指數之基礎。

(2)類別層級：

類別係指同種土地覆蓋類型嵌塊體的總合，其指數是根據整個類別特性加以量化而得。

(3)景觀層級：

景觀是指標的範圍內所有類別嵌塊體的總和，景觀層級將是整個嵌塊體的特徵加以量化。

地景破碎化之成因有三大要件，原探討棲地的喪失；棲地嵌塊體大小的縮減與棲地嵌塊體隔離度 (Isolation) 的增加。其中棲地喪失的影響遠比其他棲地破碎產生的影響來的大；隔離是由於非棲地基質中所殘留的棲地間相距較遠且分散，其結果將導致基因層級生物多樣性喪失的潛能，因為它降低族群間基因的交換，容易導致物種的滅絕。基本上，嵌塊體遭受隔離、嵌塊體面積減少，會增加遭受外界環境干擾的機率，如外來物種之入侵或物理狀態的改變，而這些效應都將導致生物多樣性的衰退，造成生態系穩定性與回復力的降低。

茲將重要而廣泛使用的指標表列如下：

表 1 主要地景指標公式列表

Table 1 The major landscape metrics formula

指標名稱	縮寫	公式
類別面積	CA	$CA = \sum_{j=1}^n a_{ij} \left(\frac{1}{10,000} \right)$
地景百分比	PLAND	$PLAND = p_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} (100)$
嵌塊體數量	NP	$NP = n_i$
嵌塊體密度	PD	$PD = \frac{n_i}{A} (10,000)(100)$
最大嵌塊體指標	LPI	$LPI = \frac{\max_{j=1}^n (a_{ij})}{A} (100)$
地景形狀指標	LSI	$LSI = \frac{0.25 \sum_{k=1}^m e_{ik}}{\sqrt{A}}$
總邊緣長度	TE	$TE = \sum_{k=1}^m e_{ik}$
邊緣密度	ED	$ED = \frac{\sum_{k=1}^m e_{ik}}{A} (10,000)$
平均嵌塊體大小	AREA_MN (MPS)	$MPS = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i} \left(\frac{1}{10,000} \right)$
面積加權平均嵌塊體	AREA_AM	$AREA_AM = \sum_{j=1}^n \left[a_{ij} \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \right) \right]$
嵌塊體面積標準差	AREA_SD (PSSD)	$PSSD = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \left[a_{ij} - \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i} \right) \right]^2}{n_i}} \left(\frac{1}{10,000} \right)$
平均形狀指標	SHAPE_M N (MSI)	$MSI = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{0.25 p_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} \right)}{n_i}$
面積加權平均形狀指標	SHAPE_A M (AWMSI)	$AWMSI = \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{0.25 p_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} \right) \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \right) \right]$

平均嵌塊體碎形維度	FRAC_MN (MPFD)	$MPFD = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{2 \ln(0.25 p_{ij})}{\ln a_{ij}} \right)}{n_i}$
面積加權平均嵌塊體碎形維度指標	FRAC_AM (AWMPFD)	$AWMPFD = \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{2 \ln(0.25 p_{ij})}{\ln a_{ij}} \right) \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \right) \right]$
面積加權平均旋轉半徑	GYRATE_AM	$GYRATM_AM = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{r=1}^{z'} \left(\frac{h_{ijr}}{z} \right) \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \right) \right]$
平均鄰近距離	ENN_MN (MNN)	$MNN = \frac{\sum_{j=1}^n h_{ij}}{n_i}$
聚集指標	AI	$AI = \left[\frac{g_{ii}}{\max_{i \rightarrow j} g_{ij}} \right] (100)$
分割指標	SPLIT	$SPLIT = \frac{A^2}{\sum_{j=1}^n a_{ij}^2}$

而人為活動如農業與都市發展、道路建設，皆為造成地景破碎化的主要原因，而道路開設創造了人類遊憩、居住發展活動的管道，進而直接或間接導致物種棲地的喪失或改變，降低棲地維持原本生物多樣性的能力。野生生物棲地與族群的破碎化，係人類支配地景之常見結果，許多在人為地景中殘存的物種，常依賴各個破碎棲地的連結而存活。因此，在地景的規劃上，首要之務即是連繫已破碎化之生態棲地，許多文獻亦表示棲地的連接性，對於破碎地景植物和動物族群的持續具有相當的重要性，亦即連結隔離的嵌塊體，將有助生物多樣性的維持。以往地景指標多被用於生態景觀、生物棲地及其對生物多樣性的影響，本研究透過地景指標計算崩塌的嵌塊體，並由歷年變化將崩塌區分為等擴崩區(後期出現崩塌部分，於前期未出現者)、復育區(前期崩塌範圍於後期縮減之區域，或者崩塌區域消失恢復者)、及維持不變(前後期皆為崩塌範圍內的區域)等三種區域，以評估地文環境變化，探討集水區水文特性變化及致災影響。

四、結果與討論

1. 平均單場颱風降雨規模對 1 公頃以上崩塌地的影響

在集水區崩塌地治理中，地崩塌地往往是首要關注的對象，因為 1 公頃以上崩塌地具有高重覆崩塌且植生復育速率差的特性，易有重覆致災的可能。故本研究試以將崩塌地面積分級，挑選 1 公頃以上之崩塌地，以分析與颱風降雨之關係，及其指標特性 (表 2)。

表 2 各年 1 公頃以上崩塌地嵌塊體統計表

Table 2 The table of Collapse block (landslid?)

年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013
嵌塊體數量-NP	140	76	65	58	40	84
最大嵌塊體面積(ha)	9.04	15.08	7.16	7.52	7.5	8.56
嵌塊體總面積(ha)-CA	275.01	209.98	128.18	116.28	79.42	174.06
嵌塊體平均面積(ha)-MPS	1.96	2.76	1.97	2.00	1.99	2.07

嵌塊體面積標準差 (ha)-AREA_SD	1.27	2.59	1.26	1.33	1.35	1.53
年降雨量(mm)	5463	3791	3031	2012	3785	3738
大於 100mm 颱風個數	4	1	1	1	2	3
大於 100mm 颱風總降雨量(mm)	2938	2367	535	363	839	1905
大於 100mm 颱風平均降雨量(mm)	734.5	2367	535	363	419.5	635

在考量相應集水區範圍大小的空間尺度下，1 公頃以上崩塌嵌塊體數量和總面積的變化大致與年雨量有關。

而單一崩塌的形成，與降雨規模存在正向關係，陳樹群等人(2013)在高屏河流域的研究指出，2009 年莫拉克颱風累積降雨約是往年颱風的 1.7 至 4.8 倍，誘發崩塌面積較往年約 5.3 倍大，使崩塌面積超過 1km² 的案例從 1 個變 4 個，說明單場颱風降雨規模對大型崩塌的影響。

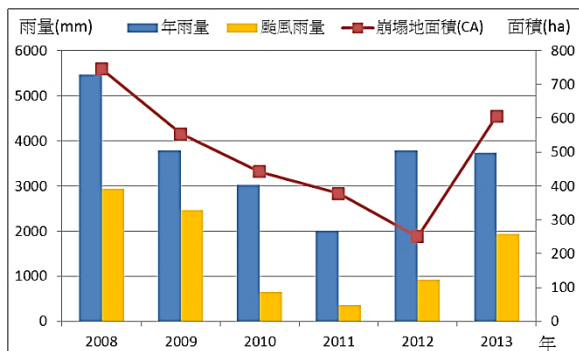


圖 3 集水區各年 1 公頃以上崩塌面積與降雨量變化圖
Fig.3 The variation of collapse area and rainfall

2.面積及數量相關指標

(1) 擴崩區

由表 3 可得知，在經過 2008 年及 2009 年連續兩年有大規模降雨颱風且年雨量大的侵擾下，崩塌的面積與數量指標較高，而後隨著後續幾年的穩定，擴崩的面積也較少，至 2013 年後，才因有大規模的颱風，導致面積攀升（圖 5），擴崩區的總面積指標變化與各年崩塌地的總面積變化趨勢一致，可相當的反應各年遭受大型颱風的狀況。

擴崩區嵌塊體數量 (NP) 在前兩年 (2008-2009 年、2009-2010 年) 差異不大，在 2010 年到 2012 年穩定期間有減少的趨勢，至 2013 年才又上升（圖 4）；以平均嵌塊體面積大小 (MPS) 及面積標準差 (AREA_SD) 來衡量嵌塊體面積的差異性，以 2008-2009 年的擴崩區嵌塊體平均面積最大，其標準差也為逐年之冠（圖 6），表示 2009 年莫拉克颱風的極端事件造成嚴重的崩塌破壞外，對大型擴崩的產生具影響的影響力，故該年新擴崩的崩塌面積大小差異很大，但受大型極端值影響下，平均面積指標表現仍大；其次在 2013 年後的大型颱風侵擾後，才又出現平均面積與標準差同步大幅上升的情況。

表 3 各崩塌分類逐年面積與數量相關指標表
Table 3 The number of avalanche classification related indicators

時間變化	類別	嵌塊體總面積 (ha)	嵌塊體數量	嵌塊體密度	平均嵌塊體大小 (ha)	嵌塊體面積標準差
		CA	NP	PD	MPS	AREA_SD
2008-2009	擴崩區	350.78	3361	31.12	0.11	0.43
	復育區	538.29	4229	39.16	0.14	0.22
	維持不變區	203.37	2002	18.54	0.11	0.27
2009-2010	擴崩區	220.52	3480	32.22	0.07	0.09
	復育區	335.5	3720	34.44	0.10	0.19
	維持不變區	218.65	2026	18.76	0.12	0.33
2010-2011	擴崩區	190.48	2754	25.50	0.08	0.10
	復育區	254.92	3368	31.19	0.08	0.10
	維持不變區	184.03	1665	15.42	0.12	0.32
2011-2012	擴崩區	86.51	1282	11.87	0.08	0.09
	復育區	213.59	2513	23.27	0.10	0.14
	維持不變區	160.92	984	9.11	0.19	0.40
2012-2013	擴崩區	438.41	4409	40.82	0.11	0.15
	復育區	82.29	2295	21.25	0.04	0.06
	維持不變區	167.44	1309	12.12	0.15	0.37

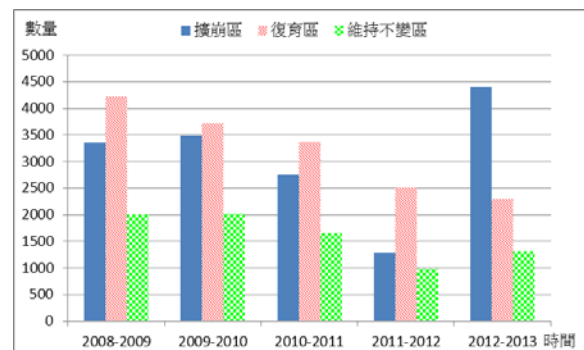


圖 4 逐年各崩塌類別數量指標(NP)變化
Fig.4 Collapse Category Quantity variation

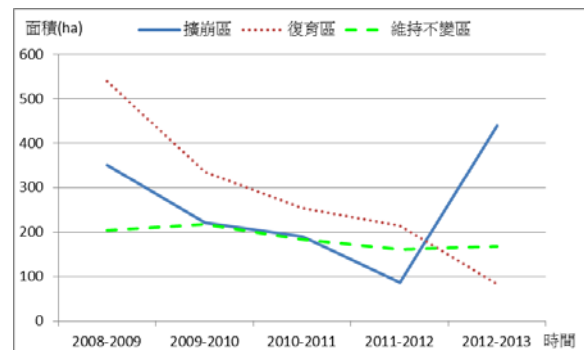


圖 5 逐年各崩塌類別總面積指標(CA)變化
Fig.5 The total area of collapse Category Indexes Change

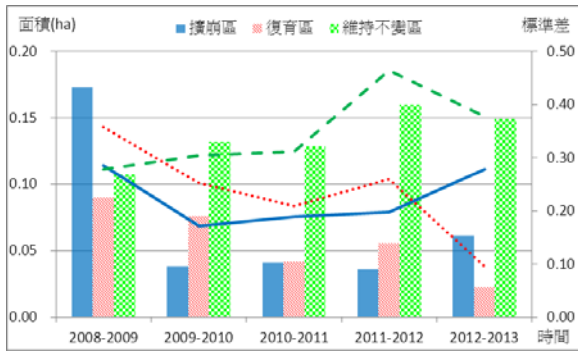


圖 6 逐年各崩塌類別平均面積 (MPS) 與面積標準差 (AREA_SD) 變化

Fig.6 The variation of collapse average area and area standard deviation

由於各崩塌類別是經由前後期崩塌地分布位置進行空間差集而得，故可將擴崩區面積除以後期崩塌地面積，即可得到後期年份的崩塌地新擴崩百分比(圖 7)，可用以衡量該年的崩塌有多少比例受到當年事件而導致新崩塌，結果顯示 2009 年的擴崩比佔 63%，2010 年與 2011 年皆佔 50%，2012 年最低，僅佔 35%，2013 年佔 72%，為各年最高；2009 年的雖有極端事件，但因 2008 年颱風事件使研究區亦產生不少崩塌，故 2009 年的崩塌地有 37% 是與 2008 年崩塌範圍重疊(維持不變區崩塌)，使得崩塌比的分析上不比穩定年後的 2013 年表現。

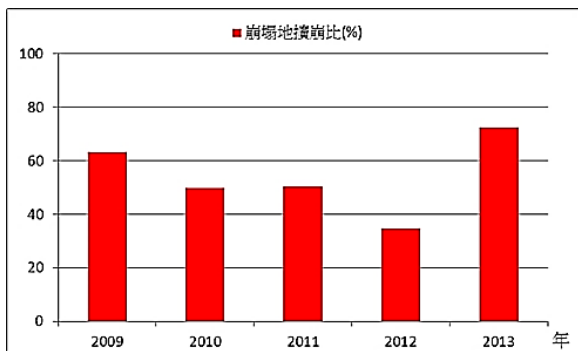


圖 7 各年新擴崩面積佔各年崩塌面積百分比

Fig.7 New collapsed area of the total percentage of collapse area

(2) 復育區

由表 3 可得知，崩塌復育區的嵌塊體面積 (CA) 逐年呈現下降的趨勢，嵌塊體數量 (圖 4) 也逐漸下降，其中又以 2008-2009 年復育面積最為廣大 (圖 5)，顯示前期 2008 年大量的崩塌地在經歷 2009 年莫拉克極端事件後，環境仍有高度的承受能力，可在大型擾動事件中充分展現恢復彈性；由平均面積(MPS)及面積標準差 (AREA_SD) 指標分析，兩者趨向一致，即平均面積大，面積標準差亦大 (圖 6)，說明 2008-2009 年及 2009-2010 年兩個年際復育面積大小差異較大。

崩塌復育區是由前期崩塌範圍減去後期崩塌範圍的空間差集所組成，故可將復育區崩塌總面積除以前期崩塌地面積，可得到前期年份的崩塌地復育百分比 (圖 8)，可用以衡量該年崩塌地在年時間尺度下，復育的速率，結果顯示

復育比以 2008 年最高，佔 72.2%，表示 2008 年的崩塌地到 2009 年有近 72% 已恢復，2009 年至 2011 年逐年略為下降，復育比尚在 55% 以上，崩塌復育狀況尚稱良好，2012 年復育比下滑至 33%，由於該年擴崩比亦不高，故研判 2012 年有大面積的維持不變區崩塌，即屬於舊有崩塌，且有易復崩難恢復的特性，因此呈現在缺乏颱風干擾的情況下，恢復比仍舊不高之因。

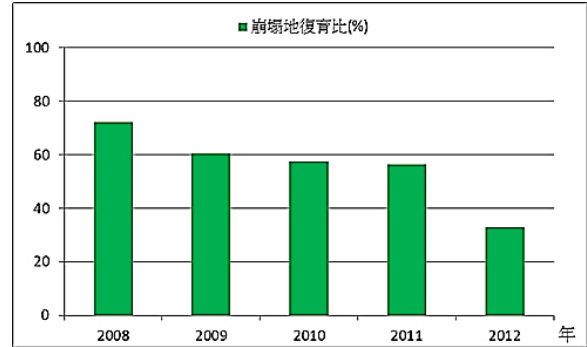


圖 8 各年復育面積佔各年崩塌面積百分比

Fig.8 Repopulation area percentage of collapse area

(3) 維持不變區

由表 3 可得知，2009-2010 年最高，爾後到 2012 年間，因穩定恢復而略有下降，2013 年在潭美、康芮等颱風影響下，面積再略微上升，整體而言維持不變區總面積逐年變動小，顯示舊有崩塌地復育不易的特性。研判是逐年的恢復速率下，使維持不變區崩塌嵌塊體數量減少，剩下維持不變區的崩塌皆屬面積較大者難恢復者。

(4) 各崩塌分類年間面積轉變交叉分析

將各年間的崩塌分類，透過地理資訊系統進行空間聯集運算後計算類別間相互轉變的面積量，可再進一步評估復育(或擴崩)後的嵌塊體穩定性。以擴崩後再復育來說，2010 年約有 80.05% 的復育地是由 2009 年的擴崩組成的，2011 年的復育地有 72.08% 由 2010 年擴崩組成，2012 年復育地有 59% 由 2011 年擴崩組成，2013 年復育地有 56.54% 由 2012 年擴崩組成，顯示擴崩面積越大，佔隔年復育面積的比例就越大；同時分析 2009 年先擴崩 2010 年再復育的面積佔前期擴崩總面積的 76.57% (轉變比)，2010 年先擴崩 2011 年再復育的面積佔前期擴崩總面積的 83.32%，2011 年先擴崩 2012 年再復育的面積佔前期擴崩總面積的 66.16%，2012 年先擴崩 2013 年再復育的面積佔前期擴崩總面積的 53.79%，顯示多數擴崩在來年時就會復育，復育速率相當快，2010 年至 2012 年的先擴崩後再復育來源比明顯比前兩期大幅下降，表示在前兩期(2008 年至 2010 年、2009 年至 2011 年)的崩塌地高度頻繁在擴崩與復育間轉變，擴崩區與復育區的空間分佈在此段時期有高度重疊，崩塌地狀況極不穩定。

表 4-1 2008 年至 2010 年各類崩塌面積移轉交叉分析表

Fig.4-1 2008-2010 collapse area crosstab table

		2009-2010					
類別		擴崩區	復育區	維持不變區	非崩塌		
類別	面積(ha)	220.52	335.5	218.65			
2008 - 2009	擴崩區	350.78	268.58	82.2		擴崩後再復育轉變比	76.57 %
	復育區	538.29	136.03		402.26	復育後再擴崩轉變比	25.27 %
	維持不變區	203.37		136.45		常年擴崩維持比	67.09 %
		復育後再擴崩來源比	擴崩後再復育來源比	長年崩塌來源比			
		61.69%	80.05%	62.41%			

表 4-2 2009 年至 2011 年各類崩塌面積移轉交叉分析表

Fig.4-2 2009-2011 collapse area crosstab table

		2010-2011					
類別		擴崩區	復育區	維持不變區	非崩塌		
類別	面積(ha)	190.48	254.92	184.03			
2009 - 2010	擴崩區	220.52	183.74	35.1		擴崩後再復育轉變比	83.32 %
	復育區	335.5	115.63		219.87	復育後再擴崩轉變比	34.46 %
	維持不變區	218.65		147.17		常年擴崩維持比	67.31 %
		復育後再擴崩來源比	擴崩後再復育來源比	長年崩塌來源比			
		60.70%	72.08%	79.97%			

表 4-3 2010 年至 2012 年各類崩塌面積移轉交叉分析表

Fig.4-3 2010-2012 collapse area crosstab table

		2011-2012					
類別		擴崩區	復育區	維持不變區	非崩塌		
類別	面積(ha)	86.51	213.59	160.92			
2010 - 2011	擴崩區	190.48	126.02	64.46		擴崩後再復育轉變比	66.16 %
	復育區	254.92	18.85		236.07	復育後再擴崩轉變比	7.39%
	維持不變區	184.03		96.46		常年擴崩維持比	52.42 %
		復育後再擴崩來源比	擴崩後再復育來源比	長年崩塌來源比			
		21.79%	59.00%	59.94%			

表 4-4 2011 年至 2013 年各類崩塌面積移轉交叉分析表

Fig.4-4 2011-2013 collapse area crosstab table

		2012-2013					
類別		擴崩區	復育區	維持不變區	非崩塌		
類別	面積(ha)	438.41	82.29	167.44			
2011 - 2012	擴崩區	86.51	46.53	39.98		擴崩後再復育轉變比	53.79 %
	復育區	213.59	104.25		109.34	復育後再擴崩轉變比	48.81 %
	維持不變區	160.92		125.78		常年擴崩維持比	78.16 %
		復育後再擴崩來源比	擴崩後再復育來源比	長年崩塌來源比			
		23.78%	56.54%	75.12%			

3. 形狀相關指標

在形狀指標應用上，對於個別的嵌塊體的差異較不敏感，在周長和面積維持不變的情況下，不同形狀的嵌塊體會具有相同的形狀指標值，故形狀指標不適用於量測個別嵌塊體形態，但卻是量測整體嵌塊體形狀複雜程度的好指標。

表 5 各崩塌分類逐年形狀指標表

Table 5 Collapse classification of shape index

時間變化	類別	平均形狀指標 SHAPE_MN	面積加權平均 形狀指標 SHAPE_AM	平均碎形維度 FRAC_MN	面積加權平均 碎形維度 FRAC_AM
2008-2009	擴崩區	1.189	1.971	1.054	1.130
	復育區	1.249	1.792	1.064	1.126
	維持不變區	1.193	1.744	1.055	1.123
2009-2010	擴崩區	1.204	1.510	1.062	1.110
	復育區	1.238	1.821	1.063	1.131
	維持不變區	1.214	1.908	1.059	1.138
2010-2011	擴崩區	1.227	1.565	1.067	1.117
	復育區	1.221	1.547	1.061	1.111
	維持不變區	1.221	1.835	1.061	1.133
2011-2012	擴崩區	1.092	1.263	1.024	1.057
	復育區	1.140	1.413	1.034	1.078
	維持不變區	1.163	1.581	1.037	1.093
2012-2013	擴崩區	1.222	1.632	1.054	1.111
	復育區	1.142	1.421	1.045	1.087
	維持不變區	1.241	1.792	1.066	1.126

應用在討論崩塌地嵌塊體時，不同類型的崩塌地其形態上的破碎與否代表的影響性不同，以擴崩區崩塌來說，其形狀越趨於不規則，對周邊其他非崩塌地的接觸邊緣大且深入，其影響性也較規則形狀的崩塌要來的大；然而對復育區嵌塊體來說，形狀趨於不規則卻有利於增加與鄰近崩塌的接觸邊緣對比，有助於向鄰近崩塌復育前進。各崩塌分類的形狀指標如表 5。

表 6 各年際崩塌分類面積排序第三四分位數
Table 6 Range of collapse category area

時間	第三四分位(75%)		
	擴崩區	復育區	維持不變區
2008-2009	800	1400	925
2009-2010	800	900	800
2010-2011	800	900	900
2011-2012	800	800	1600
2012-2013	1200	400	1200

(1)擴崩區

依據逐年擴崩區崩塌面積次數統計結果顯示，各年際的擴崩區崩塌多屬小面積為主，各年際第三四分位皆在 1200 平方公尺以下 (表6)，顯示小面積擴崩個數遠多於大面積擴崩，因此在平均嵌塊體碎形維度指標 (FRAC_MN) 及平均形狀指標 (SHAPE_MN) 上，指標值傾向描述小型擴崩形狀為主。根據兩者的平均指標結果 (圖9)，小型擴崩的形狀指標在 2008-2009 年後逐年略為上升，代表小型崩塌在這幾年作用仍旺盛，在 2009 年莫拉克颱風後，崩塌地穩定條件不佳，後兩年間仍有許多復育後隔年再崩塌的狀況發生，故形態表現複雜；2011-2012 年呈現反陡降趨勢，研判是崩塌地條件已趨於穩定，導致新擴崩的小型崩塌形態上較為簡單。

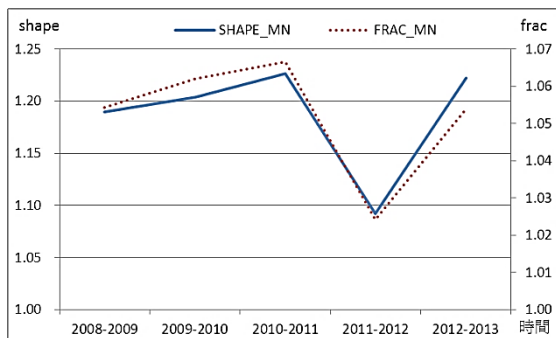


圖9 逐年擴崩區崩塌平均形狀及碎形維度指標值變化
Fig.9 The growth collapse area variation of mean shape index and fractal dimension index

而碎形維度及形狀指標的平均面積加權指標 (FRAC_AM), (SHAPE_AM) 則可做為大面積擴崩區的形狀相關指標值(圖10)，可以發現1公頃以上擴崩仍以2009年莫拉克後的形狀最為複雜，2012年大型崩塌數量少，形態亦趨於簡單，隨2013年大量颱風降雨，又使大面積擴崩形態轉向複雜。

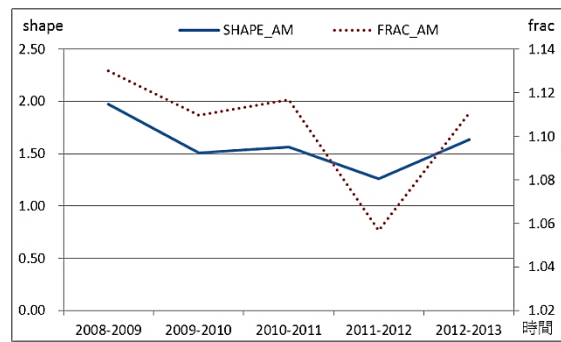


圖10 逐年擴崩區崩塌平均面積加權形狀及碎形維度指標值變化

Fig.10 The growth collapse area variation of area-weighted mean patch fractal dimension

(2)復育區

崩塌地復育區的面積亦多屬小面積為主，第三四分位多在 1400 平方公尺以下(表 5)，以平均碎形維度指標 (FRAC_MN) 及平均形狀指標 (SHAPE_MN) 來描述小型復育崩塌的形狀特性(圖 11)。

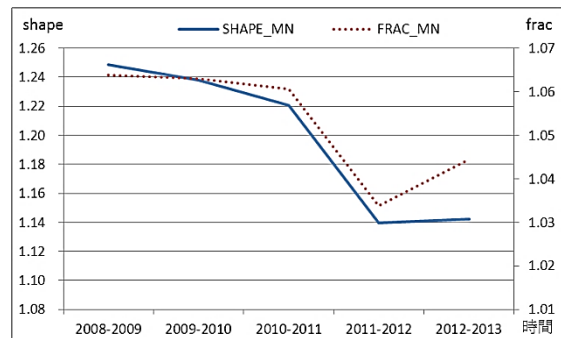


圖11 逐年崩塌復育區平均形狀及碎形維度指標值變化
Fig.11 The Repopulation area variation of mean shape index and fractal dimension index

在平均形狀指標表現上，小規模復育區的指標呈現逐年下降的趨勢，在前三個年變化的小型復育形狀較為複雜，2011-2012 年的小型復育地形狀大幅趨於簡單化，代表復育情況趨於穩定，形狀上沒有前幾年來的複雜，直至 2012-2013 年才又使形狀指標上升。

在面積加權平均形狀指標上，面積加權碎形維度 (FRAC_AM) 及面積加權形狀指標 (SHAPE_AM) 反映大面積復育地形狀的主要支配性，指標顯示大面積的復育地在 2008-2009 年以及 2009-2010 年有明顯較高的複雜形狀(圖 12)，研判是 2008 年及 2009 年因颱風降雨量大，崩塌面積多，在隔年的快速復育下，許多大面積的復育作用良好，2011-2012 年亦是因多年復育下穩定，使得面積加權形狀指標下降。

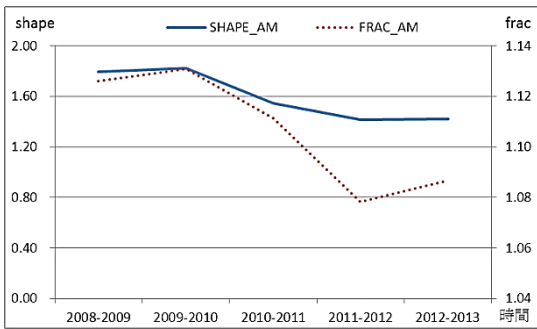


圖12 逐年崩塌復育區平均面積加權形狀及碎形維度指標值變化

Fig.12 The repopulation area variation of area-weighted mean patch fractal dimension

(3)維持不變區

維持不變區崩塌在面積上仍以小面積為主，因為維持不變區常與擴崩區及復育區有共同邊緣，故形狀複雜度會受兩者共同影響，在平均形狀指標 (SHAPE_MN) 與平均碎形維度指標 (FRAC_MN) 表現(圖 13)上衡量小型維持不變區崩場地形狀。2008 年至 2011 年小型維持不變區崩塌平均形狀指標呈現逐年略升，2011-2012 年復育良好，擴崩地少且形狀簡單，使共邊的小型維持不變區崩塌形狀指標下降，2012-2013 年再隨復育區及擴崩形的平均形狀指標上升而遽增。

衡量大面積維持不變區的面積加權形狀指標變化上(圖 14)，在2008-2011年三個年際變化期間有較為破碎複雜的型態，2011-2012年亦受到復育區及擴崩區面積加權形狀指標下降的影響而降低，2012-2013年才因擴崩發展而上升。

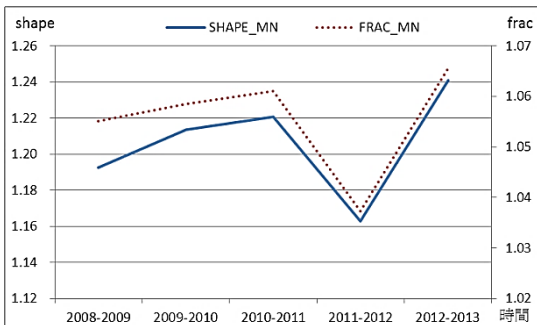


圖13 逐年維持不變區崩塌平均形狀及碎形維度指標值化

Fig.13 The unchanged region variation of mean shape index and fractal dimension index

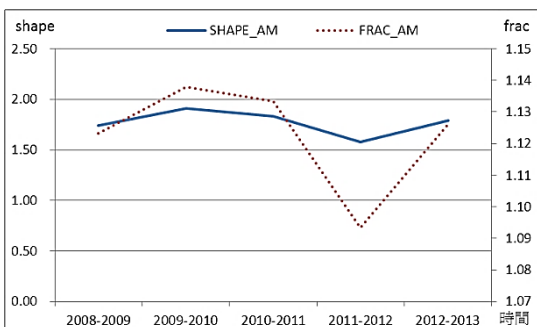


圖14 逐年維持不變區崩塌平均面積加權形狀及碎形維度指標值變化

Fig.14 The unchanged region variation of area-weighted mean patch fractal dimension

4.聚集連結度相關指標

為了度量各類嵌塊體彼此間的空間距離以及在集水區內的聚集程度，本研究挑選聚集指標 (AI)、平均最鄰近距離指標 (ENN_MN) 來進行各類嵌塊體的聚集度分析，並以面積加權平均旋轉半徑指數 (GYRATE_AM) 衡量符合面積影響力的嵌塊體延展性，各類指標值如下表：

表7 各崩塌分類逐年聚集連結度相關指標表
Table 7 Collapse classification of aggregation Index

時間變化	類別	聚集指標(%) AI	平均最鄰近距離(m) ENN_MN	面積加權平均旋轉半徑(m) GYRATE_AM
2008-2009	擴崩區	66.280	54.761	55.314
	復育區	65.962	47.643	35.854
	維持不變區	66.285	71.607	40.265
2009-2010	擴崩區	52.594	51.151	22.203
	復育區	59.689	50.974	34.578
	維持不變區	67.311	71.225	47.864
2010-2011	擴崩區	53.867	53.948	23.934
	復育區	56.287	52.024	24.527
	維持不變區	67.534	75.586	45.052
2011-2012	擴崩區	61.730	86.004	18.600
	復育區	64.712	62.786	24.382
	維持不變區	74.713	88.738	43.571
2012-2013	擴崩區	62.352	46.547	27.774
	復育區	42.031	52.642	16.172
	維持不變區	69.996	81.792	45.492

(1)擴崩區

擴崩區崩塌在聚集度 (AI) 以2009年莫拉克颱風後最顯集中，2009-2011年兩個年際間相對較低，2012年後的擴崩聚集度才有略微上升的趨勢(圖 15)；平均最鄰近距離 (ENN_MN) 各年都約在50公尺上下，唯有2012年的擴崩上升至86公尺，表示新擴崩的嵌塊體鄰近性較低(圖 16)，在面積加權平均旋轉半徑 (GYRATE_AM) 數值變化上(圖 17)，可以發現2009年莫拉克颱風後嵌塊體的旋轉半徑明顯大於其他年份，代表因莫拉克颱風造成的新擴崩延展性良好，形態上可能更偏向長條帶狀型發展。

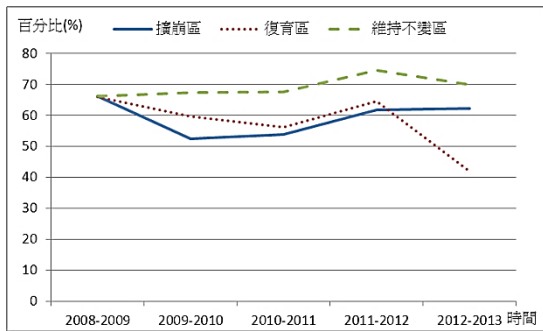


圖15 逐年各崩塌類別聚集指標(AI)變化
Fig.15 Collapse classification variation of aggregation index

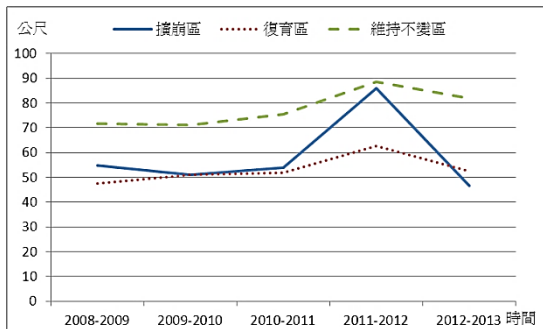


圖16 逐年各崩塌類別平均最鄰近距離(ENN_MN)變化
Fig.16 Collapse classification variation of mean nearest-neighbor distance

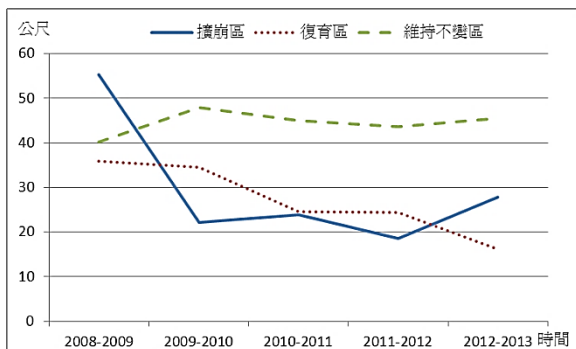


圖17 逐年各崩塌類別面積加權平均旋轉半徑(GYRATE_AM)變化
Fig.17 Collapse classification variation of area-weighted mean radius of gyration

(2)復育區

崩塌復育區在聚集指標 (AI) 表現上在2008至2011年間有逐年下降的趨勢(圖15)，而同段時間平均最鄰近距離指標 (ENN_MN) 卻是逐漸增加(圖16)，表示2008-2011年三個年際變化的復育地的空間聚集度是逐年降低，各嵌塊體間的距離也逐漸拉大，2011-2012年的聚集指標與平均最鄰近距離指標兩者皆大幅上升，表示復育集中在局部區塊，但復育地彼此距離較遠，研判許多小型崩塌已復育，使得後續復育地的間隔距離拉大所致；2012-2013年的復育地聚集度及最鄰近距離大幅下降，表示與毗鄰的復育地接觸少，但距離仍相近。在面積加權平均旋轉半徑 (GYRATE_AM) 表現上，則是逐年降低(圖17)，表示復育嵌塊體的長寬度越來越小，延展性較低。

(3)維持不變區

維持不變區的崩塌聚集度(AI)在2008至2011年間並無

太大變化(圖15)，2011-2012年間有些微上升，分布上較為集中，平均最鄰近距離 (ENN_MN) 皆明顯大於擴崩區與復育區(圖5-32)，2011-2012年為距離最大的年際，可能與長年穩定復育下，各維持不變區崩塌被復育地相對切割所致，面積加權平均旋轉半徑 (GYRATE_AM) 表現也較擴崩區與復育區穩定，平均延展距離多在40公尺至50公尺之間(圖16)。

五、結果與討論

1.結論

(1)透過集水區測站降雨資料與各年崩塌地面積變化分析，大型颱風降雨是影響 1 公頃以上崩塌的關鍵，也是影響崩塌地自然復育的重要因素，而小型崩塌地自然復育快，可在環境的常年擾動中恢復，對集水區影響小，故未來在水庫集水區管理經營的考量上，可加強對極端降雨事件後大型坡地崩塌的清查與整治，以減少可能土砂沖蝕量，降低水庫淤積速度。

(2)分析 2009 年擴崩後復育的面積佔前期擴崩總面積的 76.57%，2010 年佔前期擴崩總面積的 83.32%，2011 年佔前期擴崩總面積的 66.16%，2012 年佔前期擴崩總面積的 53.79%，顯示多數擴崩在來年時就會復育且復育速率相當快。

(3)地景指標中形狀指標在應用上對個別的嵌塊體的差異較不敏感，周長和面積維持不變的情況下嵌塊體會具有相同的形狀指標值，但對於量測整體嵌塊體形狀複雜程度卻表現良好。

(4)地景指標有助於瞭解各年際間崩塌類別的變遷情況，可得知多數擴崩地在隔年後即可復育，莫拉克極端事件造成的崩塌破壞，則需 2 到 3 年才漸趨穩定。

2.建議

(1) 因衛星影像資料以各年為期，僅能對年時間尺度進行比較，對崩塌地在雨季及旱季動態變化描述能力有限，若能取得各場颱風 (或暴雨) 前後期影像分析，更能明確掌握各大型事件對崩塌地的影響狀況，亦可取得連續性的分析成果。

(2) 運用中高空間解析度的 SPOT-4 及 SPOT-5 衛星影像，雖然利於大區域範圍研究應用，但可能影響地景指標描述嵌塊體細緻度的能力，未來可以探討不同空間解析度影像資料，對地景指標分析的影響。

參考文獻

- [1] 孔德懷，2005，崩塌地特性變遷偵測之探討—以清水溪集水區之六期影像應用為例，碩士論文，國立中興大學，水土保持系，台中。(Kong, D.H (2005). collapse to detect changes characteristic of Discussion - In Chingshui catchment area of six of imaging application, for example, Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC.(in Chinese))
- [2] 周天穎，雷祖強，陳駿賢，2003，「遙測及景觀

- 分析技術於崩塌地判釋與變遷之研究」，中華水土保持學報，第 34 卷，第 4 期，第 353-368 頁。(Zhou T.Y., Lei Z.J., Chen C.Y. (2003). *Sentenced to release telemetry and landscape analysis techniques to collapse to the changes in the study*, Chinese Soil and Water Conservation, Vol. 34, No. 4, 353 – 368. (in Chinese))
- [3] 林文賜，黃碧慧，林昭遠，周文杰，2004，「921 震災崩塌地特性分析及變遷監測之研究」，中華水土保持學報，第 35 卷，第 2 期，第 141-149 頁。(Lin T.K., Huang B.H., Lin Z.U., Zhou W.J.(2004), *921 earthquake collapse Characteristics and Changes to the monitoring of research*, Chinese Soil and Water Conservation, Vol. 35, No. 2, 141 – 149. (in Chinese))
- [4] 洪如江，林美聆，陳天健，王國隆，2000，「921 集集大地震相關的坡地災害、坡地破壞特性與案例分析」，土工技術，第 81 期，第 17-32 頁。(Hong R.J., Lin M.L., Chen T.J., Wang G.L., (2000), *921 Chi-Chi Earthquake Related it Disaster slope, slope break feature, and case analysis, technique to work*, (81), 17 –32. (in Chinese))
- [5] 張益祥，2010，應用多時期衛星影像於九九峰植生復育與崩塌潛勢分析，碩士論文，國立中興大學，土木工程研究所，台中。(Zhang Y.X., (2010), *satellite imaging applications multiple times in JiujiuFeng Vegetation Restoration and latent potential collapse analysis*, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC.(in Chinese))
- [6] 陳樹群，郭靜苓，吳俊鉉，2013，「西台灣強降雨誘發崩塌規模與區位之特性分析」，水土保持學報，第 44 卷，第 1 期，第 34-49 頁。(Chen, S.K., Guo, J.L., Wu C.H., (2013), *West Taiwan heavy rainfall-induced collapse the size and location of the characterization*, Chinese Soil and Water Conservation, 44(1), 34 - 49. (in Chinese))
- [7] 黃麗娟，莊智璋，何世華，林昭遠，2008，「衛星影像植生指標優選之研究」，水土保持學報，第 40 卷，第 1 期，第 39-50 頁。(Huang L.J., Zhuang Z.W., He S.H., Lin Z.W., (2008), *Satellite image plant raw index preferably of study*, Chinese Soil and Water Conservation, 40 (1), 39 - 50
- [8] 葉春國，廖學誠，詹進發，黃正良，薛美莉，2012，「地景指標與溪流水中硝酸鹽濃度關係之探討—以水里溪上游集水區為例」，中華水土保持學報，第 43 卷，第 2 期，第 109-122 頁。(Ye C.G., Liao X.C., Zhan C.F., Shu M.L., (2012). *landscape indicators and stream water nitrate concentrations relationship of Discussion*, Chinese Journal of Soil and Water Conservation, 43(2), 109-122. (in Chinese))
- [9] 劉益誠，2008，應用衛星影像於 921 災後九九峰植生復育崩塌潛感，碩士論文，國立中興大學，土木工程研究所，台中。(Liu Y.C., (2008), *the application of satellite images to 921 disaster* Jiujiu Feng Vegetation Restoration latent sense of collapse, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC.(in Chinese))
- [10] 賴韋廷，2009，利用不同崩塌地分類法改進崩塌潛勢之研究—以德基水庫集水區為例，碩士論文，國立中興大學，土木工程研究所，台中。(Lai W.T., (2009), *potential collapse collapse to improve the use of different classification method of research - in Deji Reservoir Watershed as an example*, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC.(in Chinese))
- [11] de Beer, Y., van Aarde, R.J., 2008, “Do landscape heterogeneity and water distribution explain aspects of elephant home range in southern Africa’s arid savannas?” *Journal of Arid Environments*, Vol. 72 No.11, pp. 2017–2025.
- [12] Forman, R. T. T., and Godron, M., 1986, *Landscape ecology*, John Wiley & Sons Inc, New York.
- [13] Lowicki, D., 2012, “Prediction of flowing water pollution on the basis of landscape metrics as a tool supporting delimitation of Nitrate Vulnerable Zones,” *Ecological Indicators*, Vol. 23, pp. 27–33.
- [14] McGarigal, K. and Marks, B. J., 1995, *Fragstats: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*, Oregon State University Corvallis.